

М. А. Герман*, Ф. В. Макаров, Е. В. Журбина

Московский авиационный институт

(национальный исследовательский университет), г. Москва

*ferrarigerman@gmail.com

Научный руководитель — проф., д-р техн. наук С. В. Сковцова

ВЛИЯНИЕ ТЕРМОВОДОРОДНОЙ ОБРАБОТКИ НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА ОБРАЗЦОВ ИЗ ТИТАНОВОГО СПЛАВА Ti-6Al-4V, ПОЛУЧЕННЫХ ПРИ ПОМОЩИ 3D-ПЕЧАТИ

В рамках данной работы было изучено влияние термоводородной обработки на структуру и механические свойства образцов из титанового сплава Ti-6Al-4V, полученных при помощи аддитивной технологии послойного селективного лазерного сплавления.

Ключевые слова: титановый сплав, аддитивные технологии, порошковая металлургия, селективное лазерное сплавление, 3D-технологии, 3D-принтер, термическая обработка, термоводородная обработка.

M. A. German, F. V. Makarov, E. V. Zhurbina

THE EFFECT OF THE THERMOHYDROGEN PROCESSING ON THE STRUCTURE AND PROPERTIES OF SAMPLES MADE OF TITANIUM ALLOY Ti-6Al-4V OBTAINED BY 3D-PRINTING

The effect of thermohydrogen processing on the structure and mechanical properties of titanium alloy Ti-6Al-4V samples, obtained by additive manufacturing technology was investigated in this work.

Key words: titanium alloy, additive manufacturing, powder metallurgy, selective laser melting, 3D-technology, 3D-printer, thermohydrogen processing.

На первом этапе работы были изучены структура, твердость и плотность образцов из титанового сплава Ti-6Al-4V после селективного лазерного сплавления (SLM). Металлографический анализ показал, что структура образцов представлена мартенситом α' . Твердость образцов колеблется 35–39 ед. HRC. Плотность, определенная методом гидростатического взвешивания, составила 4,42 г/см³.

На следующем этапе работы была оценена возможность преобразования структуры и управление свойствами 3D-образцов с помощью термоводородной обработки.

Наводороживающий отжиг 3D-образцов из сплава Ti–6Al–4V проводили до концентрации 0,6 мас. % при двух температурах: 850 °С, что соответствовало β -области, и 750 °С, что соответствовало $(\alpha+\beta)$ -области после завершения процесса. Наводороживающий отжиг в $(\alpha+\beta)$ -области был совмещен с вакуумным отжигом.

Введение в 3D-образцы 0,6 % водорода при температуре 850 °С с последующим охлаждением до комнатной температуры приводит к формированию β -структуры с небольшим количеством α'' -мартенсита. Наводороживание в двухфазной области приводит к формированию трехфазной $(\alpha+\alpha_2+\beta)$ -структуры.

Окончательной операцией термоводородной обработки является вакуумный отжиг. Он необходим не только для преобразования структуры, но и для снижения содержания водорода в сплаве до безопасных концентраций.

Для проведения вакуумного отжига было выбрано несколько режимов отжига: 1) при температуре 820 °С выдержка 4 ч; 2) при 625 °С выдержка 8 ч; 3) при 550 °С выдержка 3 ч, нагрев до 820 °С, выдержка 4 ч.

Металлографический анализ показал, что образцы, наводороженные в β -области, после вакуумного отжига имеют $(\alpha+\beta)$ -структуру. Поскольку после наводороживающего отжига в структуре присутствовал мартенсит, при вакуумном отжиге α -фаза наследует его пластинчатую морфологию (рис. 1). При ступенчатом и низкотемпературном вакуумном отжиге наблюдается измельчение структуры. Структура после данных режимов значительно мельче (рис. 1, б, в) по сравнению со структурой после вакуумного отжига при 820 °С (рис. 1, а). Измельчение структуры приводит к увеличению твердости от 34 ед. HRC после вакуумного отжига при 820 °С до 39 ед. HRC после вакуумного отжига при 625 °С (рис. 1).

Одноступенчатый отжиг при 820 °С и ступенчатый вакуумный отжиг образцов, наводороженных при 750 °С, т. е. в $(\alpha+\beta)$ -области, приводит к формированию равновесной $(\alpha+\beta)$ -структуры (рис. 2, а, б). После низкотемпературного вакуумного отжига при 625 °С формируется трехфазная $(\alpha_{\text{дег}}+\beta+\alpha_2)$ -структура. Дисперсность структурных составляющих увеличивается с понижением температуры вакуумного отжига. Однако это практически не сказывается на значениях твердости, которая составляет 34–35 ед. HRC.

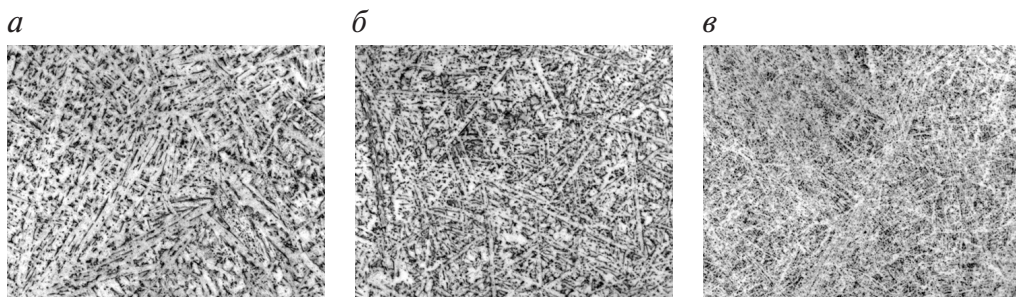


Рис. 1. Микроструктура 3D-образцов сплава Ti–6Al–4V после наводороживающего отжига при 850 °С и последующего вакуумного отжига при температуре, °С:

a — 820; *б* — 550–820; *в* — 625

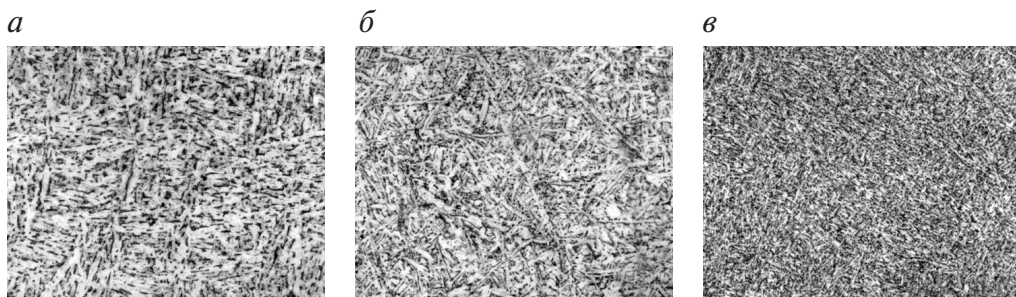


Рис. 2. Микроструктура 3D-образцов из сплава Ti–6Al–4V после наводороживающего отжига при 750 °С и последующего вакуумного отжига при температуре, °С:

a — 820; *б* — 550–820; *в* — 625

На заключительном этапе работы были проведены механические испытания 3D-образцов из сплава Ti–6Al–4V. Режимы обработки и результаты кратковременных испытаний на растяжение, удар и малоцикловую усталость представлены в табл. 1.

Анализ результатов показывает, что образцы в исходном состоянии имеют прочность порядка 1130 МПа, что объясняется их мартенситной структурой. Сопоставимый уровень прочности (1110–1120 МПа) дает режим термоводородной обработки с низкотемпературным вакуумным отжигом (режимы 4 и 7). При этом большой роли не играет область наводороживания. Термоводородная обработка обеспечивает предел прочности около 920–940 МПа (режимы 2, 3, 5 и 6). Данные значения сопоставимы с прочностью для отожженного деформированного полуфабриката из сплава Ti–6Al–4V (900–1050 МПа).

Значения предела прочности, относительного удлинения и ударной вязкости, полученные после испытания двух образцов, несильно отличаются. А значения относительного сужения для двух испытанных об-

разцов, обработанных по одинаковому режиму, отличаются в два раза (режимы 2, 4 и 7). Проведенный анализ структур образцов в месте излома не выявил в них существенной разницы. Возможно, такая разница в значениях относительного сужения связана с несовершенством 3D-печати, в частности, из-за образования микропористости.

Таблица 1

**Механические свойства 3D-образцов
после различных режимов обработки**

Режим обработки	σ_b , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %	ψ , %	KCU, МДж/м ²
1. Исходное состояние	1130	1040	11	25	0,29
	1130	1040	11	35	0,23
2. НО: 850 °С, C _H = 0,6 %Н ВО: 820 °С, 4 ч, печь	935	905	14	64	0,76
	940	895	17	44	0,71
3. НО: 850 °С, C _H = 0,6 %Н ВО: 550 °С, 3 ч, печь + 820 °С, 4 ч, печь	940	900	18	62	0,8
	920	850	18	57	0,85
4. НО: 850 °С, C _H = 0,6 %Н ВО: 625 °С, 8 ч, печь	1115	1050	14	51	0,32
	1120	1050	8	25	0,34
5. НО: 820 °С, охл. до 750 °С, C _H = 0,6 % ВО: 820 °С, 4 ч, печь	930	910	20	67	0,64
	930	910	18	67	0,61
6. НО: 820 °С, охл. до 750 °С, C _H = 0,6 % ВО: 550 °С, 3 ч, печь + 820 °С, 4 ч, печь	925	905	16	65	0,53
	915	850	18	58	0,5
7. НО: 820 °С, охл. до 750 °С, C _H = 0,6 % ВО: 625 °С, 8 ч, печь	1120	1085	13	42	0,21
	1100	1070	7	20	0,21

Работа выполнена с использованием оборудования ресурсного центра коллективного пользования «Авиационно-космические материалы и технологии» МАИ.